

# Traitement ou recyclage... Les réacteurs biphasiques, au service du traitement de l'air

Par Ir. Sébastien Gillet

*Ces dernières années, la pollution de l'air est devenue une préoccupation pour ses impacts environnementaux et sur la santé. Les réglementations contrôlant les émissions d'air pollué se sont d'ailleurs multipliées. Face à ces problèmes, des solutions de traitement ont été développées, certaines utilisant même les potentialités des microorganismes pour épurer les effluents industriels. Les limites de ces traitements biologiques classiques sont même en voie d'être repoussées par une nouvelle génération de systèmes : les réacteurs biphasiques.*

## La problématique des composés organiques volatils

Il existe bon nombre de polluants ayant un impact négatif sur l'environnement et la santé. Parmi ceux-ci, on retrouve les composés organiques volatils (COV). Un COV est défini comme un composé contenant des atomes de carbone et d'hydrogène (auxquels se substituent partiellement ou totalement des atomes d'halogènes, d'oxygène, de soufre, de phosphore ou d'azote) et se trouvant à l'état de vapeur dans les conditions de fonctionnement d'une installation. Les processus industriels sont les principaux générateurs d'effluents gazeux contenant des composés organiques volatils.

La problématique liée aux émissions de COV réside dans les nuisances directes et indirectes qu'ils occasionnent.

Les effets directs des composés organiques volatils sur l'homme sont liés à leur toxicité intrinsèque. À de fortes concentrations, les composés tels que le benzène, le toluène et le xylène ont des effets aigus sur le système nerveux central. En revanche, à faible concentration, on parle alors de toxicité chronique, les effets diffèrent notablement. Ces composés sont tous trois responsables du syndrome « psycho-organique » caractérisé par des troubles de la mémoire et des performances intellectuelles. Et ce n'est pas tout. Comme en témoignent de nombreuses études épidémiologiques, le benzène est même considéré comme hématotoxique et inducteur de leucémie. D'autres COV peuvent également être responsables de cancers ou d'irritations diverses. En réponse aux risques potentiels que présentent les COV sur la santé, l'organisation mondiale de la santé (OMS) a édicté des valeurs guides afin d'établir des normes de qualité de l'air.

Les COV ont également un impact indirect. Lorsqu'ils sont rejetés dans l'atmosphère, ils participent à des réactions chimiques radicalaires complexes telles que le dérèglement du cycle de Chapman qui induit une augmentation de la concentration d'ozone dans la troposphère (figure 1), avec des conséquences telles qu'une participation au réchauffement climatique et aux pluies acides. La seule action efficace à long terme pour réduire cette pollution consiste à réduire drastiquement dans l'air ces précurseurs d'ozone. C'est d'ailleurs ce que préconise l'Europe via les plafonds d'émissions imposés aux pouvoirs institutionnels compétents, la Région wallonne notamment.

Ainsi, l'évolution légale aux différents échelons de pouvoirs planétaires entraîne une multitude de prises de décisions visant à réduire les émissions de COV dans l'atmosphère. Ces dernières années, des efforts conséquents ont été accomplis pour réduire

Figure 1 : La nocivité du smog urbain est en partie due à l'ozone troposphérique.



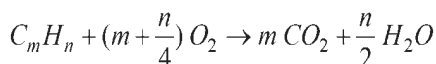
les pollutions liées tant aux procédés de combustion à finalité énergétique qu'aux transports en général. Une stagnation des émissions est à présent observée. Mais bien au-delà des normes, l'impact sur l'homme et l'environnement est suffisant pour justifier la maîtrise des pollutions gazeuses émises. Si une approche préventive est plus élégante pour minimiser les rejets, il reste souvent nécessaire de recourir à des actions curatives supposant la mise en œuvre de procédés de traitement des rejets gazeux.

### Des techniques de traitement de l'air existent

Sous la pression des nouvelles réglementations, différentes techniques de traitement des effluents ont été mises au point ou améliorées, chacune se révélant efficace pour certains types et certaines concentrations de polluants. Il faut différencier les techniques de récupération (adsorption, absorption et technologie membranaires) des techniques de destruction. Les techniques de récupération sont écologiquement préférables dans la mesure où elles permettent une récupération des COV. Toutefois, la récupération est parfois trop complexe ou trop coûteuse ; c'est particulièrement le cas des effluents trop dilués ou composés d'un mélange complexe de polluants. Le recours aux technologies de destruction est alors envisagé. Parmi celles-ci, une distinction est faite entre les méthodes de destruction physique et les méthodes biologiques.

### Les techniques de destruction physique

La grande technique de destruction non biologique est l'oxydation thermique. Cette technique consiste à transformer les molécules jusqu'à l'état de  $CO_2$ . L'oxydation nécessite une grande quantité d'oxygène et d'énergie. D'une manière générale, la réaction chimique de base de la destruction des composés est la suivante :



Les systèmes d'oxydation thermique sont constitués habituellement d'une chambre de combustion munie d'un brûleur. La limite en termes d'autothermie est située à 8 g/m<sup>3</sup> d'effluent. En dessous, la combustion est incomplète et le brûleur doit être alimenté, de manière supplémentaire, par un gaz naturel. Il est parfois possible d'avoir recours à des catalyseurs mais cela peut générer des problèmes environnementaux.

### Les techniques de destruction biologique sont une alternative de choix dans de nombreux cas

La technologie de destruction physique est manifestement efficace, tant son utilisation est répandue. Néanmoins, le coût de celle-ci est parfois élevé et l'installation peut se révéler peu rentable lors du traitement d'effluents gazeux trop faiblement concentrés. Une autre alternative consiste à utiliser les potentialités des microorganismes pour dégrader biologiquement les COV. Les traitements biologiques constituent une solution de choix car ils offrent un grand nombre de possibilités de traitement économique et respectueux de l'environnement. Dans de tels systèmes, les microorganismes sont le moteur de la dégradation des polluants. En d'autres termes, la bactérie réalise l'oxydation biologique du composé polluant en l'utilisant comme source d'énergie et de carbone (c'est-à-dire, comme nutriment). Cette oxydation donnera des composés intégrables au cycle de Krebs du procaryote. Pour oxyder un composé carboné, la bactérie a constamment besoin d'être approvisionnée en oxygène. Un dispositif d'aération doit donc être intégré à chaque système de traitement. Une dégradation en conditions anaérobies est également possible mais moins répandue car beaucoup plus longue. Si les phénomènes de dégradation biologique sont largement répandus dans la nature et couramment employés en épuration d'eau usée, l'utilisation des microorganismes dans le traitement de l'air est récente. Des recherches sont donc conduites afin d'élaborer des procédés biologiques performants et économiques.

Les organes de traitement existants peuvent être appelés « bioréacteurs ». D'une manière générale, ceux-ci sont classés en trois catégories bien distinctes.

#### Les biofiltres

La biofiltration proprement dite est le plus conventionnel et le plus ancien procédé pour le traitement de l'air, développée initialement en Europe et au Japon dès le début des années 1960. Les premiers biofiltres construits étaient à ciel ouvert, constitués de terre ou de compost, et traversés par un réseau de canalisations perforées, permettant la répartition de l'air. Dans les biofiltres (figure 2a), les microorganismes sont fixés sur un matériau (tourbe, fibres, compost, écorces, copeaux de bois, billes de céramique, etc.) au sein d'un réacteur que le flux chargé en polluant traverse de haut en bas, de bas en haut ou horizontale-

ment. Sur ce matériau, arrosé périodiquement, se forme un film bactérien. Au passage de l'effluent, les polluants y sont absorbés et oxydés. Lors de l'aspersion, un apport nutritif complémentaire ou un apport de chaux permet de réguler le système. La capacité d'élimination d'un tel système trouve sa limite aux alentours de 100 à 140 g de polluant par m<sup>2</sup> de biofiltre et par heure. Au-delà, le système sature et le polluant excédentaire est rejeté.

#### Les filtres percolateurs

Récemment, les filtres percolateurs (figure 2c) ont été mis en œuvre à l'échelle industrielle. Ils constituent une amélioration du procédé de biofiltration classique par l'utilisation de garnissages fixes ou déposés en vrac sur lesquels percole la phase aqueuse, pour le reste, la régulation est assez similaire. Dans la majorité des cas, l'air atteint rapidement la saturation en eau dans le filtre. Les boues pouvant se former sont entraînées avec la phase liquide circulante. Elles sont ensuite éliminées par simple décantation. Comme pour les biofiltres, la limitation de cette technique se situe au niveau de la solubilité des éléments à traiter. De ce fait, cette technique n'est pas adaptée aux polluants faiblement solubles dans l'eau.

#### Les biolaveurs

Le procédé de biolavage consiste en une étape de séparation physique par l'absorption en solution de composés volatils, suivie d'un traitement biologique de la phase aqueuse (figure 2b). L'air est épuré par passage dans une colonne d'absorption (contacteur gaz-liquide). Le contacteur gaz-liquide généralement préféré pour réaliser cette opération est une colonne à garnissage dans laquelle circulent à contre-courant l'effluent gazeux et l'eau. Le courant liquide en sortie de la colonne d'absorption, chargé en polluants dissous, est dirigé vers un bassin de régénération où les composés chimiques sont biologiquement dégradés. La gestion de ce type d'appareillage est toutefois très complexe et nécessite une maîtrise importante par du personnel qualifié.

### L'alternative biologique recèle cependant certaines limites...

Les systèmes biologiques comportent quelques limites, car la conception même de ces infrastructures ne permet pas toujours d'éviter les passages préférentiels, le tassement et la dégradation du support ainsi que les pertes de charges

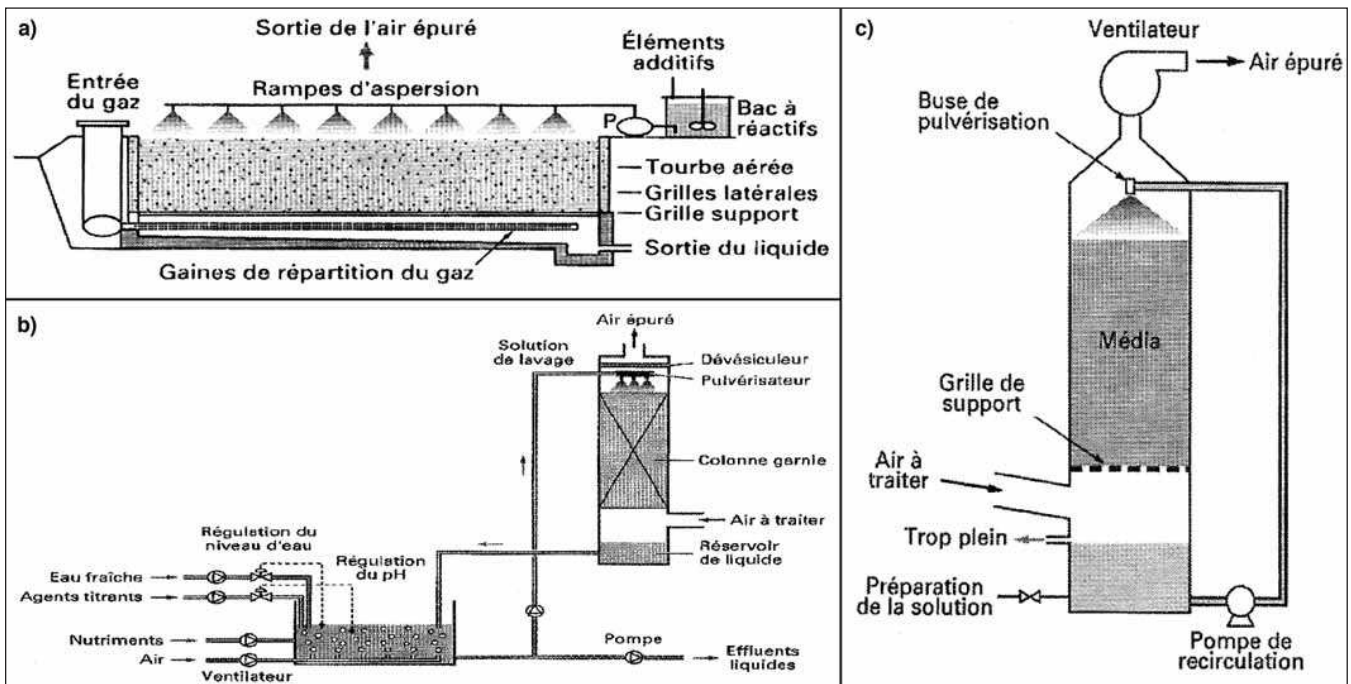


Figure 2 : Les systèmes de traitement biologique des effluents gazeux rencontrés dans l'industrie : a) biofiltre, b) biolaveur, c) filtre percolateur. (Pré et al., 2004)

induites par le développement de la biomasse et donc, du biofilm.

Une autre limite des systèmes biologiques traditionnels se situe au niveau du transfert de masse. Le transfert de masse<sup>1</sup> de l'oxygène ou du polluant est un des paramètres les plus importants des bioréacteurs car il conditionne en partie leur efficacité. Selon le modèle de Whitman (théorie du double film), le taux de transfert de la phase gazeuse vers la phase liquide peut être quantifié par l'équation suivante :

$$\frac{dC_L}{dt} = k_L a (C_L^0 - C_L)$$

Avec :  $\frac{dC_L}{dt}$  : taux volumique de transfert d'élément ( $\text{mole.l}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ),  $C_L$  : concentration de l'élément dissous dans la phase liquide ( $\text{mole.l}^{-1}$ ),  $C_L^0$  : concentration de l'élément dissous à la saturation ( $\text{mole.l}^{-1}$ ),  $k_L a^2$  : coefficient volumétrique du transfert de masse ( $\text{s}^{-1}$ ).

Ce transfert de molécules revêt une importance capitale dans l'efficacité d'un traitement. Les techniques biologiques précédentes sont souvent limitées par le faible transfert en polluant et en oxygène, de la phase gazeuse aux microorganismes. Cela s'explique par la faible solubilité de certains composés organiques volatils apolaires<sup>3</sup>, en milieu aqueux. Dans de telles conditions, le terme  $C_L^0$  de l'équation prend des valeurs assez faibles ce qui génère un mauvais transfert gaz-liquide d'oxygène et de polluant.

De plus, ces systèmes sont incapables de préserver les microorganismes de pics (ou, dans une moindre mesure, de variations) de concentration en polluant qui peuvent se révéler, selon la nature de ces molécules, par-

ticulièrement destructeurs. En effet, si les microorganismes doivent être alimentés constamment en substrat, on constate cependant une inhibition de l'activité microbienne voire une mortalité cellulaire lorsque ces concentrations en polluant deviennent trop élevées. Par contre, lorsque les concentrations sont trop faibles, les microorganismes manquent de nutriment et deviennent alors moins efficaces. Ces techniques ne sont donc intéressantes que pour de faibles et constantes concentrations en COV hydrosolubles ( $< 1 \text{ g/m}^3$ ).

Enfin, ces systèmes présentent une période de maturation particulièrement longue pendant laquelle les microorganismes doivent s'adapter (par sélection naturelle) à leur nouvel environnement.

Pour pallier à cela, une nouvelle génération de bioréacteurs est développée depuis peu : les réacteurs biphasiques.

### Les réacteurs biphasiques sont une nouvelle alternative repoussant les limites de fonctionnement des traitements biologiques classiques

Les réacteurs biphasiques (*Two-Phase Partitioning Bioreactors* : TPPB) font partie des procédés de traitement biologique en développement.

Un réacteur biphasique de traitement des COV peut être décrit comme une cuve (un bioréacteur) contenant une

Figure 3 : Mécanismes physico-chimiques et biologiques impliqués dans les TPPB. (A) Dissolution des composés hydrophobes/toxiques dans la phase non aqueuse. (B) Transfert des molécules dans la phase aqueuse et absorption par les microorganismes en suspension. (C) Absorption du substrat à l'interface par les microorganismes y adhérant. (D) Production de tensioactifs. (Déziel et al., 1999')

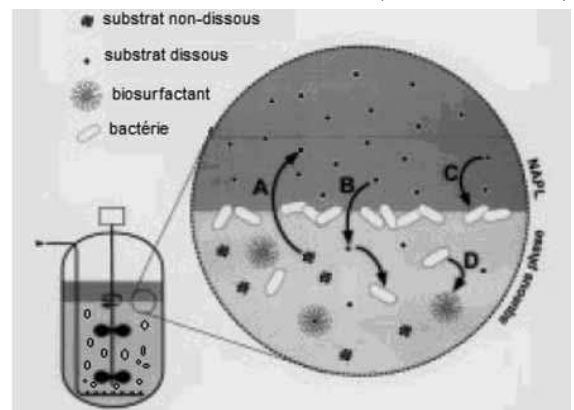
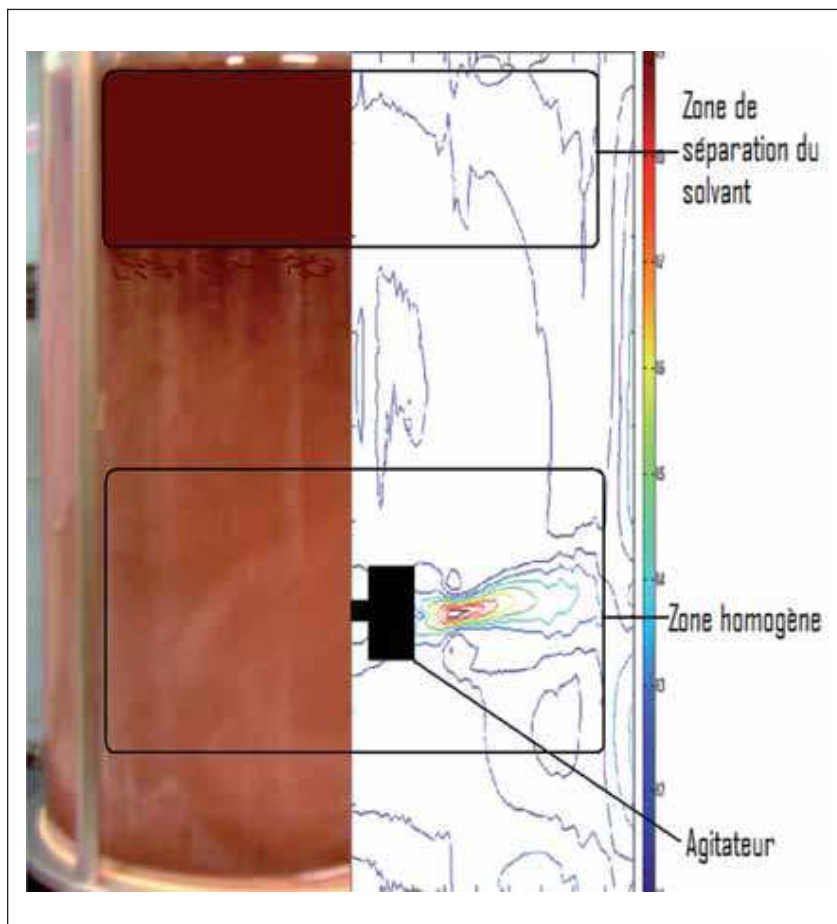




Figure 4 : Visualisation du caractère inhomogène d'un milieu biphasique sous agitation modérée – en ordonnée : les gradients de vitesses observés au sein du réacteur (Gillet 2008)<sup>9</sup>



phase aqueuse constituée par un milieu de culture et une phase immiscible et biocompatible avec la première, ces phases étant intimement mises en contact par l'agitation et l'aération. Les microorganismes se développant dans le milieu de culture permettent la dégradation des polluants contenus dans l'effluent gazeux qui est injecté avec de l'air dans le réacteur (figure 3). Ce système de traitement consiste à transférer, dans la phase liquide, les molécules polluantes de l'effluent gazeux qui seront utilisées comme source de carbone pour les microorganismes présents dans le TPPB. Le bon déroulement du procédé est caractérisé par un transfert optimal du polluant (et de l'oxygène), d'une part de la phase gazeuse à la phase liquide, et d'autre part vers son site de dégradation au niveau de la cellule microbienne. Ainsi, le solvant utilisé dépendra des caractéristiques du polluant cible et des microorganismes impliqués dans le processus de biodégradation.

Un tel dispositif présente toujours les avantages des systèmes biologiques par rapport aux méthodes physiques, mais il permet en outre de résoudre certains problèmes rencontrés dans les systèmes biologiques classiques de traitement. En effet, dans les TPPB constituées d'un mélange de deux phases immiscibles, la solubilisation des composés hydrophobes, tel que certains COV, est possible car la présence d'une seconde phase organique apolaire (hydrophobe) améliore

leur solubilité. Il y a une grande affinité entre le solvant et le polluant à éliminer (ainsi que l'oxygène), ce qui permet d'augmenter considérablement la concentration à saturation ( $C_L^0$ ). Par conséquent, le transfert de masse au sein de réacteurs biphasiques est nettement amélioré et le rendement de dégradation du polluant également.

De plus, malgré les grandes concentrations en polluants qui peuvent être mises en jeu, les microorganismes localisés dans la phase aqueuse n'en perçoivent que des quantités non inhibitrices. Cet effet « tampon » de la phase organique permet une meilleure adaptation du système aux changements brusques de concentration en polluants. Le système est également complètement agité ce qui génère un milieu homogène.

### Leurs potentialités doivent encore être évaluées et certains mécanismes mieux compris...

Les réacteurs biphasiques sont des systèmes qui sont toujours à l'étude actuellement. Afin d'évaluer les potentialités d'un TPPB destiné au traitement d'effluents chargés en COV, plusieurs études ont été réalisées au sein du Centre wallon de Biologie industrielle (FUSAGx) du Professeur P. Thonart. Les investigations ont été menées sur trois fronts différents. Tout d'abord, l'efficacité du système à transférer et biodégrader les polluants a été évaluée. Ensuite la faisabilité de « scale up »<sup>5</sup> a été testée. Enfin, des recherches plus fondamentales ont été menées afin d'identifier les mécanismes impliqués dans le transfert de masse. Les recherches se sont soldées par des résultats très encourageants, promettant un bel avenir à la technique.

Ainsi, les systèmes ont, pour commencer, démontré leur efficacité en terme de biodégradation des polluants. Certains auteurs rapportent, qu'à l'échelle du laboratoire, le TPPB présente une capacité d'élimination du benzène contenu dans un effluent de 3 à 13 fois supérieure à celle du biofiltre. D'autres études menées à la FUSAGx<sup>6</sup> mettent en évidence une efficacité d'élimination intéressante de l'isopropylbenzène contenu en forte concentration dans des effluents (6 g/m<sup>3</sup>).

D'autre part, dans un réacteur de grandes dimensions, la problématique susceptible d'être rencontrée est la mauvaise homogénéisation entre les phases aqueuses et organiques, découlant de leurs différences de densité et d'hydrophobicité. Dans une telle situation, les gradients de cisaillement observés au sein du bioréacteur (figure 4) pourraient même générer une séparation du solvant (rouge foncé<sup>7</sup>) dans la partie la moins agitée du réacteur.

Une augmentation de l'agitation n'est pas toujours envisageable car cela peut induire un stress microbien important. Cependant, les systèmes utilisent des souches bactériennes spécifiques à certains types de polluants. Chaque souche de bactérie possède des propriétés de surface spécifiques, c'est-à-dire un caractère hydrophile ou au contraire, plutôt hydrophobe. Certaines souches ont également la capacité de synthétiser des agents tensioactifs<sup>9</sup> (figure 3). Cela va donc avoir pour conséquence de conférer des propriétés physicochimiques particulières au système biphasique.

Les études<sup>10</sup> menées au sein de la FUSAGx ont permis de montrer que la présence naturelle de microorganismes et de molécules tensioactives dans le bioréacteur permettait, à travers leurs propriétés interfaciales, de conserver un milieu homogène, même à grande échelle. Cela est important car un milieu inhomogène induit nécessairement la présence de pics de concentrations en polluant extrêmement nocifs pour la biomasse ainsi qu'un mauvais transfert de masse de l'oxygène et du polluant, ce qui réduit globalement les performances du système. Les réacteurs biphasiques semblent donc être des systèmes applicables à l'échelle industrielle jusque des volumes de 100 m<sup>3</sup>, c'est-à-dire capable de traiter 6 000 m<sup>3</sup> d'effluents par heure.

Enfin, des études ont été réalisées d'un point de vue plus fondamental afin d'identifier les mécanismes impliqués dans le transfert de masse. Si celui-ci est nettement amélioré dans les réacteurs biphasiques, l'impact exact des constituants biotiques du système, rarement pris en compte dans les modèles théoriques de transfert, restait cependant à déterminer. Les microorganismes et les molécules tensioactives présentes sont en effet susceptibles de modifier la résistance au transfert ( $1/k_L$ ) ainsi que la taille de la surface d'échange gaz-liquide ( $a$ )<sup>2</sup>.

Lors de nos recherches<sup>11</sup>, nous avons donc développé une technique permettant de mettre en évidence l'impact important des constituants biotiques sur les composantes du  $k_L a$ . Cette technique a donné de très bons résultats et a notamment permis de comprendre un peu mieux le rôle que pouvait jouer les composants biotiques d'un système biphasique sur le transfert de masse, à travers leurs activités aux interfaces gaz-liquide. La biomasse microbienne et les molécules tensioactives sont donc des éléments à prendre impérativement en compte dans les tentatives de modélisation de transfert de masse en milieu biotique.

## Conclusions

Le traitement de l'air en réacteur biphasique est une manière élégante d'éliminer les VOC des effluents gazeux. La technique résout les

problèmes rencontrés dans les systèmes biologiques classiques et permet de traiter des effluents plus concentrés en polluants, mais en dessous de la limite d'autothermie des chambres d'oxydation physique. Ce système semble promis à de belles perspectives de développement dans les années futures, d'autant plus qu'il est fort probable que de nouvelles normes en matière de qualité de l'air intérieur voient le jour. La mise au point de bioréacteurs constitués de consortiums bactériens offre également des perspectives d'avenir à cette méthode de traitement. Enfin, il est encore possible d'améliorer la conception de ces installations afin de les rendre plus efficaces encore, voire même de les combiner avec d'autres systèmes pour offrir une épuration optimale. La recherche est loin d'être finie...



Ir. Sébastien Gillet

a obtenu son Diplôme d'Ingénieur Chimiste et des Bio-industries avec Grande Distinction à la FUSAGx en 2008. Son mémoire sur **l'Évaluation de l'impact des propriétés tensioactives et d'hydrophobicité de surface sur le transfert gaz-liquide au sein d'un réacteur biphasique et son extrapolation** lui a valu non seulement une Plus Grande Distinction, mais aussi le prix de l'AIGx 2008 primant le meilleur travail de fin d'étude. Son article nous en donne un aperçu.

Sébastien Gillet est actuellement assistant à l'Unité de Chimie biologique industrielle à Gembloux. Il poursuit en parallèle un Master en Gestion Technologique et Industrielle à la Solvay Business School (ULB) ainsi qu'un doctorat en Sciences agronomiques et Ingénierie biologique avec pour thème **Hydrolyse de la biomasse lignocellulosique** à Gembloux.

Le Journal des Ingénieurs lui souhaite la pleine réussite dans sa jeune carrière.

## Notes

<sup>1</sup> Le transfert d'oxygène ou transfert de masse de l'oxygène (ou du polluant) est une mesure de la quantité d'oxygène qui peut être transférée de la phase gazeuse à la phase liquide au cours du temps. C'est en quelque sorte une mesure de la capacité qu'a le bioréacteur à s'oxygéner et atteindre la saturation en oxygène (ou en polluant).

<sup>2</sup> Rappelons que «  $k_L$  » (m/s) est le coefficient de transfert de masse de la matière dans le film liquide et «  $a$  » (m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>), l'aire interfaciale spécifique, autrement dit : la surface d'échange gaz-liquide.

<sup>3</sup> Un composé apolaire ou hydrophobe est un composé qui n'est pas (ou que très faiblement) soluble dans l'eau à cause du caractère polaire de l'eau. À l'inverse, un composé polaire ou hydrophile aura tendance à bien se solubiliser dans l'eau mais pas dans les solvants apolaires.

<sup>4</sup> Déziel et al., 1999

<sup>5</sup> Le scale up est le passage à une échelle supérieure. En général un procédé est mis au point à l'échelle du laboratoire, puis évalué à l'échelle pilote avant d'être testé à l'échelle industrielle.

<sup>6</sup> J-M Aldric and P Thonart. Performance evaluation of a water/silicone oil two-phase partitioning bioreactor using *Rhodococcus erythropolis* T902.1 to remove volatile organic compounds from gaseous effluents. *J Chem Technol Biotechnol* (2008)

<sup>7</sup> Pour les besoins de l'expérience, le solvant (de l'huile de silicone) a été coloré en rouge.

<sup>8</sup> S Gillet. Évaluation de l'impact des propriétés tensioactives et d'hydrophobicité de surface sur le transfert gaz-liquide au sein d'un système biphasique et son extrapolation. *FUSAGx* (2008).

<sup>9</sup> Les molécules tensioactives ou surfactantes sont des composés qui modifient la tension superficielle (ou interfaciale) entre deux surfaces. Les composés tensioactifs sont des molécules amphiphiles. Cela signifie qu'elles présentent deux parties de polarité différente : l'une hydrophile et l'autre hydrophobe. Ces molécules ont donc la capacité de migrer aux interfaces, d'y demeurer, et de stabiliser ainsi une mousse ou une émulsion (mélange de deux liquides immiscibles, par exemple : de l'eau et de l'huile) en diminuant la tension superficielle ou interfaciale.

<sup>10</sup> J-M Aldric, S Gillet, F Delvigne, P Thonart. Development of an original approach to evaluate effects of surfactants, biomass and pollutants on the scaling-up of a two-phase partitioning bioreactor. *J Chem Technol Biotechnol* (sous presse)

<sup>11</sup> J-M Aldric, S. Gillet, F Delvigne, C Blecker, F Lebeau, J-P Wathelet, G Manigat and P Thonart. Effect of surfactants and biomass on the gas/liquid mass transfer in an aqueous-silicone oil two-phase partitioning bioreactor using *Rhodococcus erythropolis* T902.1 to remove VOCs from gaseous effluents. *J Chem Technol Biotechnol* (2009).